

CENTRAIS HÍBRIDAS - CARACTERIZAÇÃO DA COMPLEMENTARIDADE EÓLICA E SOLAR FOTVOLTAICA EM PORTUGAL**Couto A.*, Ferreira P. **, Estanqueiro A.***

* Unidade de Energias Renováveis e Integração de Sistemas de Energia, Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), I.P., Estrada do Paço do Lumiar nº22, Lisboa, 1649-038 Portugal, antonio.couto@lneg.pt, ana.estanqueiro@lneg.pt

**Departamento de Engenharia Geográfica Geofísica e Energia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL), Campo Grande, Lisboa, 1749-016, Portugal, fc46710@alunos.fc.ul.pt

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.1005>

RESUMO

A compreensão e exploração da complementaridade da produção eólica e solar fotovoltaica (PV), podem representar uma oportunidade técnica e economicamente sustentável para aumentar a penetração destas fontes de energia renováveis (FER) nos sistemas electroprodutores. Em Portugal, atualmente já se encontra legislado o conceito de centrais híbridas, onde a complementaridade entre as diferentes FER é crucial para permitir alavancar os níveis de penetração destas tecnologias, incrementando igualmente a rentabilidade dos investimentos podendo auxiliar no cumprimento dos objetivos previstos no Plano Nacional de Energia e Clima 2030 relativamente à capacidade instalada. Neste trabalho é realizada uma avaliação do potencial das centrais híbridas (eólica + PV) em Portugal, considerando o sobreequipamento dos parques eólicos (PEs) atuais usando tecnologia solar PV, permitindo explorar a complementaridade da produção entre estas duas tecnologias e beneficiando das infraestruturas existentes (e.g., subestação). Por comparação, é igualmente avaliado o impacto de adicionar mais capacidade eólica em cada PE atual. Os resultados demonstram que devido às condições atmosféricas predominantes, Portugal apresenta um elevado potencial para adoção do conceito de centrais híbridas em larga-escala.

PALAVRAS-CHAVE: Centrais híbridas, energia eólica, energia solar PV, Decreto-lei nº 76 de 2019, PNEC 2030

ABSTRACT

Understanding and exploring the complementarity of wind and solar photovoltaic (PV) generation can represent a sustainable opportunity to increase the penetration of these renewable energy sources (RES) into power systems. The implementation of hybrid power plants is already legislated in Portugal, where the complementarity between the different RES is a key aspect that may allow to increase the levels of penetration of these technologies helping to meet the objectives established in the 2030 national energy and climate plan. In this work, an assessment of the potential of hybrid power plants (using wind and solar PV technologies) in Portugal is performed, considering the progressive installation of solar PV technology in the vicinity of the current wind parks locations (overplanting) aiming to explore the complementarity of generation between these two technologies and benefiting from the existing infrastructures (e.g., substation). By comparison, the impact of adding more wind capacity to each current wind park is also analysed. Results showed that Portugal has privileged weather conditions that allow to explore in large-scale the hybrid power plants concept.

KEYWORDS: Hybrid power plants, wind energy, solar energy, Decree-Law No. 76 / 2019, PNEC 2030

INTRODUÇÃO

A transição para uma sociedade de baixo carbono é o compromisso da União Europeia (UE) para os próximos anos. Este esforço da UE na liderança mundial desta transição é notório nos recentes Planos Nacionais de Energia e Clima (PNEC) para 2030, onde existe uma forte aposta nas tecnologias solar fotovoltaica (PV) e eólica para atender ao consumo de eletricidade (DGEG 2019).

Para atingir os objetivos destes planos nacionais, a exploração da complementaridade da produção eólica e solar PV pode representar uma oportunidade técnica e economicamente sustentável para aumentar a penetração destas fontes de energia nos sistemas electroprodutores (SE). Recentemente, vários estudos têm investigado a complementaridade temporal e/ou espacial entre diferentes fontes de energia renováveis com carácter estocástico (usualmente definidas como *variable renewable energy – VRE*) e o seu potencial para acomodar a sua variabilidade (Odeh(DGEG 2019) e Watts 2019; Couto e Estanqueiro 2020). Por complementaridade, duas abordagens diferentes podem ser consideradas: 1) a falta de recurso na região X é complementada pela sua disponibilidade, no mesmo instante, na região Y , ou 2) a falta de recurso de uma determinada tecnologia na região X é complementada na mesma região pela disponibilidade de recurso usando uma tecnologia diferente (Viviescas et al. 2019). Esta segunda abordagem despoletou o interesse pelos sistemas híbridos (por exemplo, eólico + solar PV, solar PV + hídrica) e o seu potencial tem sido analisado em detalhe para diferentes escalas temporais e espaciais em diversos trabalhos. Em (Widén 2011), foi analisada a variabilidade combinada entre a implementação em larga escala da tecnologia solar e eólica, para a Suécia. Nesse trabalho, os autores demonstraram a existência de uma correlação negativa para as escalas temporais horária a anual. Em (Monforti et al. 2020), através de um método de Monte Carlo para a análise da complementaridade em Itália, os autores observaram a existência de complementaridade entre a energia eólica e solar, em diferentes várias escalas temporais, tendo obtido elevados valores de correlação negativa, à escala mensal. Para Portugal, (Castro e Crispim 2018) analisaram a variabilidade das várias VRE e como estas se correlacionam. Os autores concluíram que existe uma correlação negativa nas várias escalas temporárias entre os perfis de produção eólica e solar PV obtendo valores de correlação de -0.88, à escala anual, e -0.24 para a escala horária. Foi ainda identificado pelos autores que o efeito de suavização de potência - *power smoothing effect* - devido à dispersão geográfica dos vários parques, permite reduzir a variabilidade da produção eólica (Estanqueiro 2008).

Em Portugal, a necessidade de compreender a complementaridade da produção VRE tornou-se ainda mais relevante no contexto das recentes alterações legislativas, nomeadamente, no Decreto-lei (DL) nº 76 de 2019, (DL 2019), que introduziu o conceito de centrais híbridas – *hybrid power plants* (Dykes et al. 2020). De acordo com a legislação portuguesa, as centrais híbridas podem comportar diferentes tecnologias de produção com base em fontes de energia renováveis e/ou tecnologias de armazenamento, não podendo, contudo exceder, em qualquer instante, a potência máxima de injeção estabelecida na atribuição de exploração das centrais. Assim, neste trabalho é realizada uma avaliação i) da complementaridade da produção eólica e solar PV através das métricas comuns neste tipo de análise e ii) do potencial das centrais híbridas (eólica + PV) em Portugal, considerando o sobreequipamento dos parques eólicos (PEs) atuais usando tecnologia PV permitindo assim explorar a complementaridade da geração entre estas duas tecnologias e beneficiando das infraestruturas existentes (e.g., subestação). Por comparação à solução de hibridização dos atuais PEs, é igualmente avaliado o impacto de adicionar mais capacidade eólica em cada PE – processo de sobreequipamento (Das et al. 2019; WindEurope 2019; Dykes et al. 2020).

IDENTIFICAÇÃO E EXPLORAÇÃO OPERACIONAL DA COMPLEMENTARIDADE À ESCALA LOCAL - CENTRAIS HÍBRIDAS

No contexto de centrais híbridas, o grau de complementaridade entre as tecnologias exploradas é usualmente avaliado com base em dois tipos de metodologias: 1) análise de correlação usando os coeficientes de Pearson, Kendall, autocorrelação, correlação cruzada, entre outros, ou 2) indicadores baseados na variabilidade como o desvio padrão e o gradiente de produção combinada (Yan et al. 2020). Estas metodologias, podem ser aplicadas em diferentes escalas espaciais e temporais e têm como objetivo compreender como dois (ou mais) recursos energéticos se interligam, aproveitando as suas diferentes características e criando sinergias, para quando comparadas com as opções baseadas numa só tecnologia, permitir, entre outros, mitigar a variabilidade das VRE, incrementar a capacidade de geração nos pontos de interligação ao SE mantendo um fluxo de energia constante que permite uma utilização mais otimizada das estruturas atuais (Dykes et al. 2020). Com esta solução há igualmente mais benefícios como, por exemplo : i) minimização do custo e impacto social associado ao reforço da rede de transporte e otimização do seu uso com instalação de mais capacidade do que a autorizada em cada ponto de injeção, ii) um uso mais eficiente do solo, pois a capacidade instalada e a produção de energia por metro quadrado de terra usada aumentam, e iii) aumento do fator de capacidade da energia podendo permitir dotar de despachabilidade estas centrais e estabelecer licitações estratégicas nos mercados de energia elétrica.

De acordo com (WindEurope 2019), para as centrais híbridas compostas por tecnologia eólica e solar, existem duas configurações possíveis, Fig. 1, sendo que, em ambas, o objetivo é maximizar o uso do ponto de ligação à rede por via do aumento da capacidade instalada a jusante da subestação de cada PE/central híbrida.

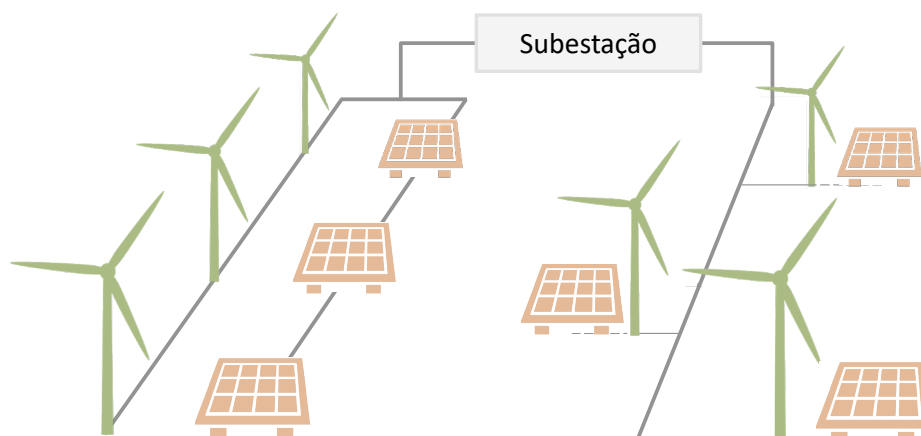


Fig. 1 - Configurações possíveis das centrais híbridas usando a tecnologia eólica e solar PV.

Na primeira configuração (lado esquerdo da Fig. 1), as tecnologias encontram-se instaladas numa área próxima entre si, permitindo a redução dos custos de acesso, operação e de manutenção e partilham apenas a mesma subestação e o ponto de ligação à rede. Esta é a configuração mais usual. A segunda configuração (lado direito da Fig. 1) passa pela ligação dos painéis solares aos terminais dos aerogeradores. Se corretamente concebida, a vantagem ao usar este tipo de configuração passa pela remoção dos inversores solares utilizando um sistema de conversão comum no aerogerador minimizando o investimento necessário. Assim, quando se pretende “hibridizar” um PE já instalado, esta configuração pode não ser praticável em alguns casos. Outra desvantagem deste tipo de configuração é o sombreamento causado pela estrutura dos aerogeradores que pode interferir no desempenho energético do sistema solar PV.

DADOS E METODOLOGIA

A análise realizada neste trabalho recorre a dados de elevada resolução espacial e temporal para 224 PEs existentes em Portugal continental. Para cada localização foram obtidos os dados da produção eólica e solar PV. Com base nestes dados, a complementaridade temporal é avaliada por meio do coeficiente de correlação à escala diária para cada localização assumindo que a tecnologia solar PV pode ser instalada nas proximidades dos PEs. Posteriormente, são assumidas diferentes configurações de sobreequipamento dos atuais PEs considerando a instalação progressiva de tecnologia i) eólica e/ou ii) solar PV, i.e., centrais híbridas. Na Fig. 2 apresenta-se um fluxograma esquemático da metodologia implementada, sendo que uma explicação mais detalhada de cada passo é providenciada nas subseções seguintes.

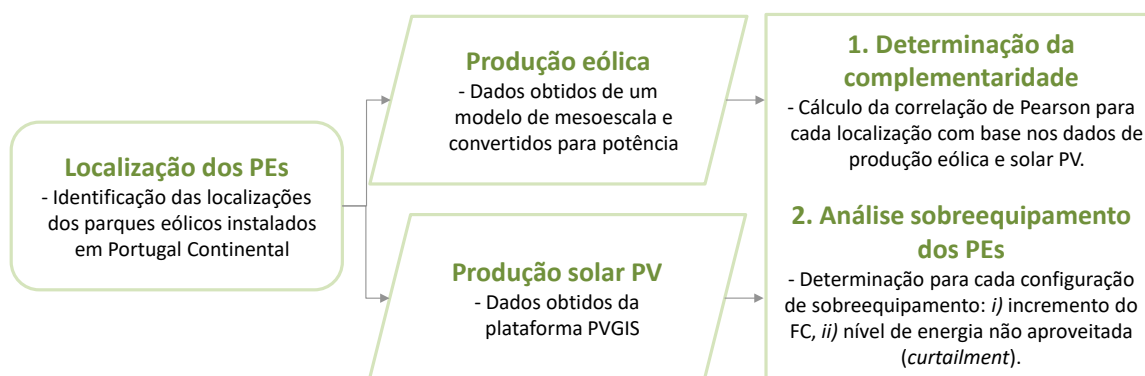


Fig. 2. Fluxograma esquemático da metodologia implementada.

Dados

Neste trabalho foram usados dois anos de dados compreendidos entre 01 janeiro de 2015 e 31 dezembro de 2016. Relativamente aos dados da componente eólica, estes foram obtidos recorrendo a um modelo numérico de mesoescala. Com base nestes modelos é possível realizar, de uma forma rigorosa, avaliações regionais e/ou nacionais da velocidade do vento sem recorrer a uma extensa e onerosa rede de estações anemométricas. Esses modelos têm a capacidade de descrever, de forma precisa, o comportamento e a evolução das massas de ar e de tratar explicitamente os fenómenos inerentes à turbulência e estratificação atmosférica. O modelo de mesoescala usado é designado por *Fifth Generation Model*, conhecido como MM5 (Grell et al. 1995), e foi calibrado para a região em análise, como descrito detalhadamente em (Couto et al. 2019).

O modelo numérico fornece informações da velocidade do vento com resolução temporal de uma hora e tem resolução espacial de 1 km. A velocidade do vento representativa de cada localização foi extraída para os 80 metros acima do nível do solo. Para o cálculo da produção eólica, os dados da velocidade do vento foram convertidos, utilizando a curva de potência do aerogerador mais comum em Portugal - Enercon E82 com 2 MW. De acordo com a curva de potência oficial, apenas é possível extrair energia para velocidades do vento superiores a 2 m/s e abaixo de 25 m/s. A potência nominal de 2.0 MW é atingida aos 13 m/s. A utilização de uma curva de potência de referência, como a utilizada neste estudo, fornece uma relação quantitativa ideal entre a velocidade do vento e a produção. Embora outros parâmetros meteorológicos, bem como a configuração de cada PE tenham um impacto na curva de potência medida no local, estes efeitos foram negligenciados neste trabalho assumindo-se um caso ideal.

Os dados da produção solar PV foram obtidos recorrendo à ferramenta PVGIS desenvolvida na *Unit Renewable Energy and Energy Efficiency* (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis.html>). Estes são derivados dos dados de radiação solar do *Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CMSAF)* (Mueller et al. 2009; Huld e Mu 2012). Esta base de dados foi amplamente validada por vários autores demonstrando elevada precisão nas suas estimativas, permitindo uma caracterização adequada da radiação solar/produção solar em qualquer parte do mundo (Urraca et al. 2017; Psiloglou et al. 2020). A resolução temporal dos dados é de 1 hora, com uma resolução espacial ligeiramente superior a 3 km no nadir. Neste estudo, os dados foram extraídos para os mesmos pontos geográficos dos PEs instalados em Portugal continental. Foi considerado um painel de silício cristalino com a seguinte configuração: 1 MW de potência de pico instalada, perdas globais do sistema iguais a 10% e os ângulos de azimute e inclinação que maximizam a produção anual de energia considerando a influência do ensombramento do terreno circundante a cada ponto. A influência das condições atmosféricas (por exemplo, temperatura e velocidade do vento) na eficiência do módulo também é considerada neste conjunto de dados.

Avaliação da complementaridade

O nível de complementaridade em cada ponto em análise, i.e., local de instalação dos atuais PEs, é baseado na análise de correlação usando o coeficiente de Pearson. Esta métrica quantifica como duas variáveis se relacionam linearmente sendo a métrica mais comumente usada na literatura relacionada com este tópico (Jurasz et al. 2020). Para avaliar a complementaridade em cada local, neste trabalho a correlação é determinada usando médias diárias. Os coeficientes de correlação entre a produção eólica e solar são calculados nos pontos de coordenadas (x, y). Dada a série temporal de produção eólica, $W_d(x, y, t)$, e solar PV, $S_d(x, y, t)$, obtidas para os t dias, com $t = 1, \dots, T$ (onde $T = 731$ é o número total de dias contidos nos dois anos analisados), o coeficiente de correlação diário é fornecido por:

$$R_d(x, y) = \frac{\sigma_{d,ws}}{[\sigma_{d,w}\sigma_{d,s}]^{1/2}}$$

$$\sigma_{d,ws} = \sum_{t=1}^T \{[W_d(x, y, t) - W(x, y)][S_d(x, y, t) - S(x, y)]\}$$

$$\sigma_{d,w} = \sum_{t=1}^T [W_d(x, y, t) - W(x, y)], \sigma_{d,s} = \sum_{t=1}^T [S_d(x, y, t) - S(x, y)]$$

onde $W(x, y)$ e $S(x, y)$ são as médias dos dois anos da produção eólica e solar PV, respetivamente. Este coeficiente de correlação varia de -1 (complementaridade muito elevada entre as duas séries temporais) a 1 (similaridade muito elevada entre as duas séries temporais). Um valor de 0 significa que não existe relação linear entre as duas variáveis (Jurasz et al. 2020).

Configurações de sobreequipamento dos atuais PEs

O conceito de centrais híbridas, recentemente introduzido na legislação portuguesa, foi analisado neste trabalho através do estudo do sobreequipamento dos parques eólicos atualmente já em operação. Este estudo consiste na instalação progressiva da capacidade eólica e/ou solar PV, i.e., sobreequipamento, e a respetiva avaliação de parâmetros relevantes, nomeadamente, o fator de capacidade (FC). A análise da configuração mais adequada de sobreequipamento é extremamente relevante, porque se o aumento da capacidade instalada, que naturalmente causa um aumento do FC, não for realizado de forma adequada, é de se esperar igualmente elevados períodos de excessos de produção, isto é, momentos em que o PE/central híbrida é capaz de fornecer mais energia do que pode injetar na rede. Isto leva a situações em esta energia total passível de ser extraída dos recursos primários não seja aproveitada – situação usualmente definida por *curtailment* – e requer mecanismos de controlo de todos os sistemas de produção dentro do PE/central híbrida. Adicionalmente esta energia não é remunerada o que não acarreta benefícios económicos para os produtores.

Uma vez que, um dos objetivos passa por identificar espacialmente as regiões que mais podem beneficiar das centrais híbridas, os dados de produção dos PEs foram normalizados, assumindo-se uma potência nominal de 20 MW. Este

valor corresponde ao valor médio da capacidade nominal dos PEs instalados em Portugal, sendo este o valor considerado como o máximo da capacidade injetável na rede. Importa referir que *i)* o aumento da capacidade da central híbrida não aumenta a capacidade de escoamento do mesmo, ou seja, neste estudo, a potência máxima de cada parque, em cada instante, é 20 MW, independentemente da configuração utilizada, e *ii)* o valor representativo da capacidade de cada tecnologia é obtido através da multiplicação da série original para cada localização pelo valor da capacidade considerada. Devido às limitações da aproximação considerada, não se contempla o efeito de suavização da potência associado ao aumento da capacidade através da instalação de aerogeradores/painéis espacialmente dispersos entre si.

RESULTADOS

Correlação diária

Na Fig. 3 apresentam-se os valores da correlação diária entre a produção eólica e solar PV diária.

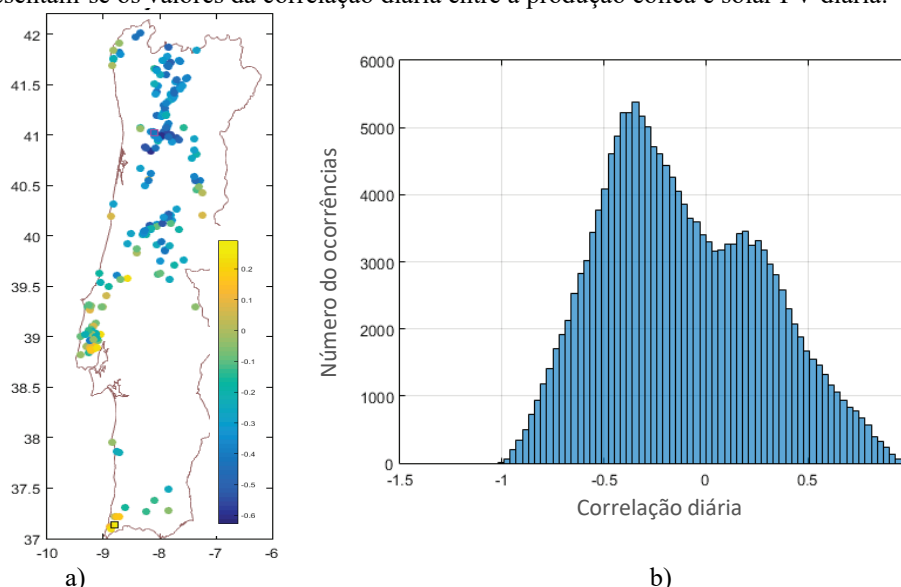


Fig. 3. Correlação diária entre produção eólica e solar PV: a) valor observado nos dois anos de análise para cada localização; e b) número de ocorrências dos valores de correlação diária.

A nível nacional, verifica-se que a grande maioria das localizações que apresentam valores de correlações negativos se encontram no interior do país. Os níveis mais elevados de complementaridade verificam-se no interior da região Centro/Norte de Portugal. As localizações que se encontram nas regiões costeiras tendem a apresentar valores fracos ou ligeiramente positivos de correlação. Assim, a produção das duas fontes de energia analisadas estão temporalmente em fase sendo este resultado explicado pelas condições atmosféricas típicas nestas regiões. Outro ponto a salientar é que, no interior do País as correlações são similares entre as diferentes localizações. No litoral, o mesmo já não acontece sendo que a correlação entre localizações varia entre positiva e negativa, mesmo entre localizações próximas. Este resultado demonstra que existe uma maior preponderância dos efeitos locais nestas regiões e que cada caso deve ser analisado de forma individual. No geral, o valor médio da correlação horária nacional é de -0.31. O valor mínimo de correlação obtido foi de -0.61 e o maior valor foi de 0.22. A Fig. 2b) permite compreender mais em detalhe os valores de correlação obtidos. Nesta figura é representado o número de ocorrências dos valores diários de correlação. A distribuição bimodal obtida demonstra que existe uma elevada frequência de ocorrência de dias que apresentam valores negativos de correlação (próximos de -0.4) mas numa parte significativa dos dias é possível observar valores fracos/ligeiramente positivos de correlação.

Análise sobreequipamento

Na Fig. 4, é apresentado o incremento do FC dos PEs existentes, considerando diferentes combinações de sobreequipamento (i.e., incremento de capacidade) recorrendo à tecnologia eólica e solar PV. Neste gráfico a configuração percentagem adicional de capacidade eólica de 50% na região “50% Solar” significa que o sobreequipamento do PE (neste caso central híbrida) é de 20 MW, 10 MW de tecnologia eólica e 10 MW de tecnologia solar PV. Neste caso, a capacidade total em análise é de 40 MW. Nos gráficos de caixa e bigodes que se apresentam nesta secção, o traço preto representa a mediana, a caixa representa os quantis 25% e 75%, respetivamente, que corresponde à distância interquartil (AI) e os bigodes estendem-se até 1.57 vezes o valor de AI.

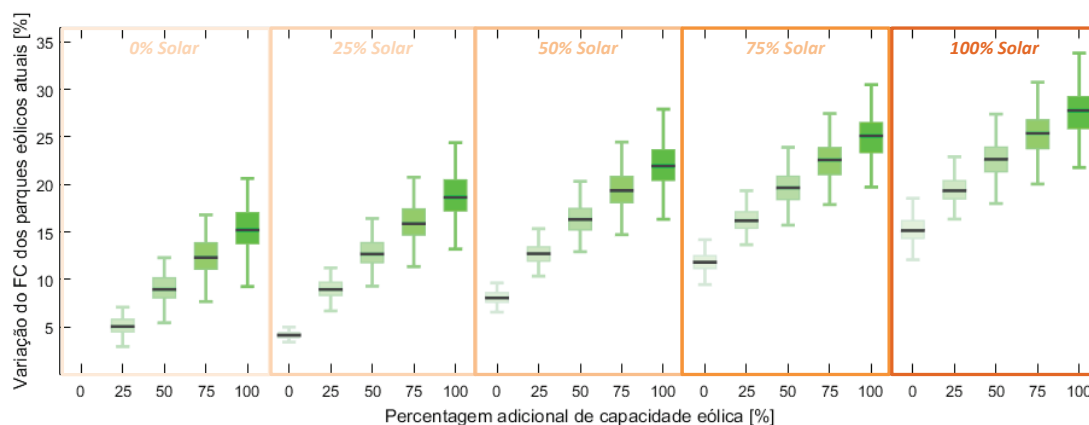


Fig. 4. Gráfico de caixas e bigodes com os valores de variação do FC dos PEs atuais para diferentes combinações de capacidade adicional recorrendo à tecnologia solar PV e/ou eólica.

Através da Fig. 4, como esperado, à medida que se aumenta a capacidade instalada de tecnologia eólica observa-se um aumento do fator de capacidade bem como da dispersão dos resultados indicando que o impacto é significativamente diferente nas configurações analisadas. Tal deve-se à diferença da disponibilidade de recurso ao longo dos PEs e, também, devido ao corte de produção por via da limitação da capacidade injetada na rede, o que faz com que os PEs que já estejam em grande parte do seu tempo à capacidade nominal, não tenham um aumento significativo do seu fator de capacidade. De referir que devido à idade da maioria dos PEs atualmente instalados, o sobreequipamento baseado em tecnologia eólica pode passar pela repotenciação (*repowering*) dos mesmos, que é uma das ações mais eficazes para aumentar a penetração desta tecnologia no SE (Odeh e Watts 2019).

O sobreequipamento do PE recorrendo à tecnologia solar, i.e., central híbrida, faz aumentar o FC com intervalo de variação mais reduzido comparativamente ao aumento em capacidade de tecnologia eólica. Destaca-se o caso 0% solar e 100% eólica e, *vice-versa*, onde apesar do valor da mediada do aumento do FC ser coincidente, cerca de 15%, a dispersão nos resultados é bastante mais reduzida no caso da tecnologia solar. Esta menor dispersão é explicada pela exploração da complementaridade entre os recursos que reduz significativamente a quantidade de energia desperdiçada, aproveitando de uma forma mais eficiente a capacidade VRE instalada em cada ponto de injeção. É ainda de realçar que para a mesma capacidade instalada, quando se opta por uma solução mista de sobreequipamento, o incremento do FC é superior ao observado recorrendo apenas a uma tecnologia. A título de exemplo, o sobreequipamento de 50% eólica/50% solar apresenta um incremento superior a uma solução baseada em 100% de tecnologia eólica ou solar PV. A dispersão dos resultados obtidos (i.e., largura da caixa e bigodes) é igualmente inferior no caso das configurações híbridas. Assim, os resultados sugerem que a exploração da complementaridade permite aumentar de uma forma mais eficiente a geração VRE, sendo a hibridização dos atuais PEs uma solução tecnicamente sustentável para cumprir com os objetivos do PNEC 2030.

De forma a compreender a existência de alguma dependência dos resultados anteriores da distribuição geográfica das localizações em análise, na Fig. 5 é possível identificar a tecnologia mais adequada para aumentar o FC dos atuais PEs em cada localização, considerando um sobreequipamento em 50% e 100% da capacidade instalada, respetivamente.

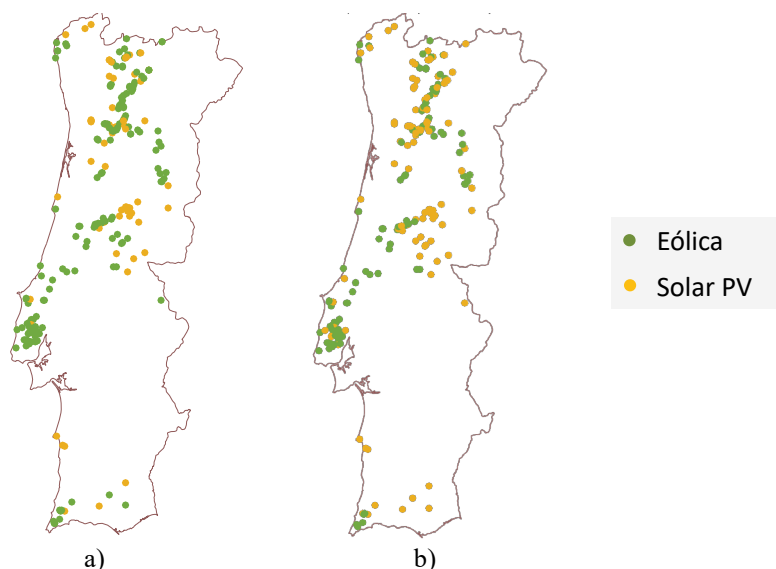


Fig. 5. Identificação da localização e tecnologia mais adequada para aumentar o FC dos PEs atuais considerando um sobreequipamento da capacidade instalada em a) 50% e b) 100%.

De acordo com a Fig. 5, para um sobreequipamento da capacidade instalada de 50% (Fig. 5a), pelo perfil de produção, a tecnologia eólica permite aumentar em 163 localizações o FC, em comparação com a tecnologia solar PV (61 locais). Nesta situação, é possível verificar alguma dispersão nas localizações onde a aposta deve passar pela tecnologia solar PV para aumentar o FC. Na Fig. 5b), cenário com sobreequipamento de 100%, verifica-se uma inversão dos resultados sendo que das 224 localizações analisadas, a tecnologia solar PV é a solução mais adequada para aumentar o FC em 114 locais, sendo estes situados maioritariamente na região interior do País. Nestes locais, os perfis de produção das duas tecnologias são complementares entre si, como é possível observar na Fig. 3. Adicionalmente, estes PEs apresentam valores mais elevados de FC e o sobreequipamento origina várias situações de *curtailment* de produção, tal como é possível observar na Fig. 6.

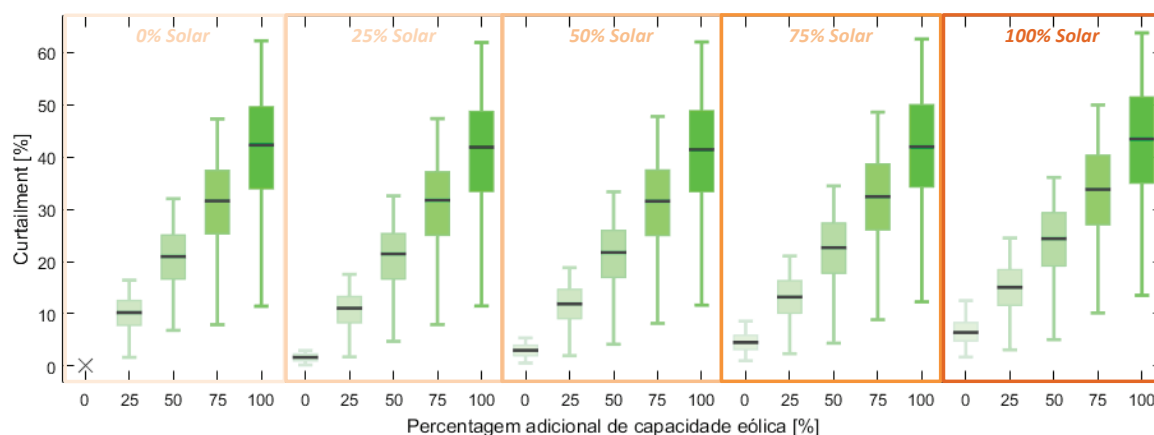


Fig. 6. *Curtailment* de energia face à produção observada durante os dois anos em análise.

Os resultados da Fig. 6 indicam que uma solução baseada apenas na instalação de capacidade eólica vai provocar um grande aumento nos níveis de *curtailment* em comparação com uma solução que passa pela exploração de centrais híbridas. A título de exemplo, o nível de *curtailment* para uma solução de sobreequipamento dos PEs atuais com 25% de capacidade eólica é superior ao nível observado para uma solução de sobreequipamento de 100 % de tecnologia solar. Os resultados sugerem que a aposta no sobreequipamento baseado em tecnologia eólica pode ser menos eficiente uma vez que é necessário cumprir com os limites de injeção na rede. Para uma situação de sobreequipamento de 50% com base em tecnologia eólica, a potência disponível não aproveitada em função do recurso primário pode atingir, em alguns casos, valores superiores a 30% da produção injetada no SE.

CONCLUSÕES

A integração em larga escala de fontes de energia renovável variável no tempo, como a energia eólica e solar fotovoltaica (PV), tem acarretado grandes desafios técnicos e económicos, que só têm tendência a aumentar em virtude dos ambiciosos objetivos de descarbonizar as sociedades nas próximas décadas. Nesse sentido, compreender a variabilidade destas fontes de energia de forma singular e agregada, quando integradas com outras tecnologias partilhando o mesmo ponto de injeção no sistema elétrico (centrais híbridas), é de extrema importância para simplificar o controlo e gestão do sistema elétrico e, simultaneamente, trazer benefícios técnico-económicos para os produtores e consumidores. Para tal, neste trabalho, a complementaridade entre a produção eólica e solar PV na localização dos atuais parques eólicos (PEs) é analisada através i) da métrica mais comum neste tipo de trabalhos – correlação de Pearson e ii) do sobreequipamento dos atuais PEs recorrendo à tecnologia eólica e/ou solar PV possibilitando a identificação do potencial das centrais híbridas, recentemente contempladas na legislação portuguesa. Os indicadores obtidos neste trabalho permitem demonstrar a importância da complementaridade entre a energia eólica e solar PV. O valor médio da correlação diária a nível nacional é de -0.31. O valor mínimo de correlação obtido foi de -0.61 e o máximo foi de 0.22. Para as regiões costeiras o nível de complementaridade demonstra uma dependência mais significativa de cada localização e, por isso, cada PE deve ser analisado de forma individual. Para as localizações analisadas, os resultados sugerem que uma solução de sobreequipamento, baseada apenas numa tecnologia, apresenta um incremento do fator de capacidade dos atuais PEs inferior a uma solução híbrida. Para níveis de sobreequipamento reduzidos (inferior a 50% da capacidade inicial), os resultados sugerem que a tecnologia eólica permite aumentar de forma mais significativa o fator de capacidade dos atuais PEs. Contudo, para não exceder o limite de injeção licenciado, o nível de energia não aproveitada em função do recurso disponível – *curtailment* – é bastante superior em comparação com uma aposta na tecnologia solar PV.

Algumas simplificações foram assumidas para a elaboração do presente trabalho, nomeadamente, a disponibilidade de área e permissões para implementação do sobreequipamento dos parques eólicos em operação – aspetos relevantes e que, em algumas localizações, podem inviabilizar a instalação da capacidade considerada. Contudo, do ponto de

vista técnico, e, devido às condições atmosféricas predominantes, Portugal continental apresenta um elevado potencial para a implementação em larga-escala de centrais híbridas. Estas representam uma oportunidade para alavancar os atuais níveis de capacidade renovável variável no tempo, permitindo cumprir com os ambiciosos objetivos estabelecidos no PNEC 2030, sem necessidade de investimentos significativos nas infraestruturas atuais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia) pelo financiamento deste estudo no âmbito do projeto OPTIGRID (PTDC/EEI-EEE/31711/2017).

REFERÊNCIAS

Castro R, Crispim J (2018) Variability and correlation of renewable energy sources in the Portuguese electrical system. *Energy Sustain Dev* 42:64–76. doi: 10.1016/j.esd.2017.10.005

Couto A, Estanqueiro A (2020) Exploring Wind and Solar PV Generation Complementarity to Meet Electricity Demand. *Energies* 13:21. doi: 10.3390/en13164132

Couto A, Silva J, Costa P, et al (2019) Towards a high-resolution offshore wind Atlas - The Portuguese Case. *J Phys Conf Ser* 1356:012029. doi: 10.1088/1742-6596/1356/1/012029

Das K, Hansen AD, Koivisto M, Sørensen PE (2019) Enhanced Features of Wind-Based Hybrid Power Plants. 4th Int Hybrid Power Syst Work

DGEG (2019) Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030 (PNEC 2030). Relatório Técnico 200

DL (2019) Diário da República, 1.ª série — N.º 106 — 3 de junho de 2019. 2792–2865

Dykes K, King J, Diorio N, et al (2020) Opportunities for Research and Development of Hybrid Power Plants Opportunities for Research and Development of Hybrid Power Plants

Estanqueiro A (2008) Impact of Wind Generation Fluctuations in the Design and Operation of Power Systems. Em: 7th international Workshop on Large Scale Integration of Wind Power and on Transmission Networks for Offshore Wind Farms. Madrid, Spain, p 7

Grell G, Dudhia J, Stauffer DR (1995) A description of the Fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Tech Note NCAR/TN-398+STR 121. doi: 10.5065/D68S4MVH

Huld T, Mu R (2012) A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Sol Energy* 86:1803–1815. doi: 10.1016/j.solener.2012.03.006

Jurasz J, Canales FA, Kies A, et al (2020) A review on the complementarity of renewable energy sources: Concept, metrics, application and future research directions. *Sol Energy* 195:703–724. doi: 10.1016/j.solener.2019.11.087

Monforti F, Huld T, Bódis K, et al (2020) Assessing complementarity of wind and solar resources for energy production in Italy . A Monte Carlo approach. *Renew Energy* 63:576–586. doi: 10.1016/j.renene.2013.10.028

Mueller RW, Matsoukas C, Gratzki A, et al (2009) Remote Sensing of Environment The CM-SAF operational scheme for the satellite based retrieval of solar surface irradiance — A LUT based eigenvector hybrid approach. *Remote Sens Environ* 113:1012–1024. doi: 10.1016/j.rse.2009.01.012

Odeh RP, Watts D (2019) Impacts of wind and solar spatial diversification on its market value: A case study of the Chilean electricity market. *Renew Sustain Energy Rev* 111:442–461. doi: 10.1016/j.rser.2019.01.015

Psiloglou BE, Kambezidis HD, Kaskaoutis DG, et al (2020) Comparison between MRM simulations, CAMS and PVGIS databases with measured solar radiation components at the Methoni station, Greece. *Renew Energy* 146:1372–1391. doi: 10.1016/j.renene.2019.07.064

Urraca R, Gracia-Amillo AM, Koubli E, et al (2017) Extensive validation of CM SAF surface radiation products over Europe. *Remote Sens Environ* 199:171–186. doi: 10.1016/j.rse.2017.07.013

Viviescas C, Lima L, Diuana FA, et al (2019) Contribution of Variable Renewable Energy to increase energy security

in Latin America: Complementarity and climate change impacts on wind and solar resources. *Renew Sustain Energy Rev* 113:109232. doi: 10.1016/j.rser.2019.06.039

Widén J (2011) Correlations between large-scale solar and wind power in a future scenario for Sweden. *IEEE Trans Sustain Energy* 2:177–184. doi: 10.1109/TSTE.2010.2101620

WindEurope (2019) Renewable Hybrid Power Plants - Exploring the Benefits and Market Opportunities. Em: Relatório Técnico. p 22

Yan J, Qu T, Han S, et al (2020) Reviews on characteristic of renewables: Evaluating the variability and complementarity. *Int Trans Electr Energy Syst* 1–21. doi: 10.1002/2050-7038.12281